

弱限制 MMI 型光功分器

尹 锐, 杨建义, 江晓清, 王明华

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027; 浙江大学硅材料国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要: 本文采用导模数值算法对 MMI(多模干涉)型光功分器 SIE 干涉区内的导模进行计算并对输出波导位置进行优化, 证明在一定条件的弱限制下器件的插入损耗和输出均匀度均超过强限制的情况, 说明 MMI 型光功分器的制作可以采用方便的湿法刻蚀, 在器件成本降低的同时其精度也得到改善。

关键词: 多模干涉; 导模; 传播常数

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 11-0093-03

Weak Guided MMI Optical Splitter

YIN Rui, YANG Jian-yi, JIANG Xiao-qing, WANG Ming-hua

(Department of Information Science & Electronics Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
State Key Laboratory of Silicon Materials, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In this paper we calculate the guided modes in SIE region of the MMI optical splitter by numerical calculation. We prove that the insertion loss and output uniformity of weak guided structure are better than that of the strong confinement, which means that we can fabricate MMI optical splitter using wet etching. That decreases the cost of device and at the same time, improves the device function.

Key words: multimode interference (MMI); guided mode; propagate constant

1 引言

光功分器是光通信系统与光信息处理系统中必不可少的器件, 同时也是构成其他集成光学器件的重要组成部分^[1], 其主要指标有损耗和各输出端口的功率均匀度等。对于纯功分器, 器件的总损耗相对重要, 而在组成其他器件如 AWG 时, 后者将占主要地位。传统的导模传输分析法^[2,3]采用旁轴近似对各阶导模的传播常数进行分析, 得出的结论为简单的解析式^[4], 基于这种分析方法, 为了获得小的损耗和高的输出端均匀度, MMI(多模干涉)型光功分器须采用强限制波导, 通常获得强限制波导的方法是干法刻蚀, 成本高且工艺造成的损耗较大。本文基于自影像的根本原理, 采用导模数值分析的方法对 MMI 功分器内各导模传播常数进行精确计算, 通过与上述近似解析法的比较, 得出在一定条件的弱限制下, MMI 型功分器更符合自影像原理的结论。这表明 MMI 功分器完全可以由简便的湿法刻蚀制作, 成本降低。最后以 1×4 功分器为例对输出波导的位置进行了优化, 并对器件的损耗和输出均匀度做了计算, 结果表明在弱限制下, 这两项指标均比强限制的情况有较大改善, 结合对湿法刻蚀的分析^[5], 器件精度将更高。

2 原理

2.1 MMI 自影像原理和导模传输法

图 1 给出了一个简单的 MMI 功分器。基于自影像原理, 在 MMI 功分器的多模干涉区 (SIE 多模波导^[1]) 中, 沿着波导的传播方向, 周期地产生输入场的单像或多像。简单地讲就是 SIE 区内各阶导模在相同传播长度上的相位差不同, 从而产生不同的结合方式。为了获得较短的干涉长度, 通常采用输入波导位于 SIE 区中心的对称输入。导模传输分析法给出了 N 重像的位置:

$$L = (pn_e W_e^2) / (N \lambda_0) \quad (1)$$

其中 p, N 为互质的整数, W_e 为考虑古斯-汉欣位移后的等效 SIE 区宽度。更详细的分析可以参考文献^[4]。

2.2 导模数值分析法原理

一般来说, 在 MMI 器件中, 输入输出波导的参数是相同的, 因此在以后的计算中, 我们将入射场波形等同于出射场波形。

在 SIE 区内, 入射场 $\phi(y) \exp[i(\beta z - \omega t)]$ 在 $z=0$ 处激起 SIE 区内各阶导模的过程可由如下方程组描述:

$$\phi(y) \exp(i\beta z) = \sum_v c_v \psi_v(y, 0) \quad (2a)$$

$$\psi_v(y, z) = \psi_v(y) \exp[i(\beta_v z - \omega t)] \quad (2b)$$

$$c_v = \frac{\int \phi(y) \psi_v^*(y) dy}{\int \psi_v^2(y) dy} \quad (2c)$$

收稿日期: 1999-11-22; 修回日期: 2000-01-25

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 69677012); 国家重点基础研究发展规划项目 (No. G1999033104); 浙江大学硅材料国家重点实验室开放课题 (No. 9811)

记 m 为 SIE 区内导模数, 则对于上述方程组有 $v = 0, 1, 2, \dots, m-1$, $v(y)$ 为 SIE 区内各阶导模的场分布, 我们称 c_v 为激励起 v 阶导模的激励系数.

随着波的传播, 传播常数的差异使得各个模式之间产生一定的相位差, 这是自影像原理的基础. 不同的相位差导致不同的组合, 在某传播长度 $z = L$ 处各个模式以一定的相位组合而成一个新的波形 out 的过程可由下述方程描述:

$$out(y, L) = \sum_v c_v v(y) \exp[i(v, L - t)] \quad (3)$$

$|out(y, L)|^2$ ($|$ 为取模) 即为 SIE 区内传播了距离 L 后的光强度分布. 如果在 $z = L, y = U$ 处引入一个输出波导, 记 C_L^U 为耦合到输出波导的光强耦合系数, 则有:

$$C_L^U = \frac{|\sum_v out(y, L)|^2 \Phi(y - U) dy}{\Phi(y - U) dy} \quad (4)$$

C_L^U 是一个关键的参数, 它本身就代表了输入端到 $y = U$ 处输出波导的强度耦合系数, 并且可以给出器件的插入损耗 IL :

$$IL = -10 \log(C_L^U) \quad (5)$$

同时下式可以体现出输入端到 $y = U$ 和 $y = W$ 处的两个输出波导强度耦合系数的均匀度:

$$|C_L^U - C_L^W| / (C_L^U + C_L^W), U, W \quad (6)$$

通过计算机编程对 SIE 区内各阶导模传播常数以及相应的场分布进行数值计算, 我们可以得到 c_v 、 out 、 C_L^U 等各项数据.

导模数值分析法忽略辐射模的影响, 这是因为绝大部分能量都被耦合到 SIE 区的导模中, 仅有很少量的能量耦合为辐射模. 为了进一步说明这个问题, 我们通过计算 c_v^2 来说明, 因为这个量代表了所有导模的功率和. 以 $n_r = 3.5$, $n_0 = 3.3$, $W = 30 \mu\text{m}$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, 输入波导宽度 $= 3.0 \mu\text{m}$ 为例, 计算所得 c_v^2 为 0.99965. 也就是说在这个例子中只有 0.035% 的能量耦合为辐射模, 这说明在导模数值分析中忽略辐射模的处理基本不影响其精度.

3 计算结果和分析

计算以 1×4 光功分器为例, 其他的功分器同理. 在以后的计算中不变的数据为 $n_r = 3.5$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$.

3.1 传播常数随 n_0 的变化

由导模传输分析法的近似得知, 自映射原理中周期性产生影像的条件是 SIE 多模波导内的各阶导模传播常数近似满足以下关系:

$$(v - v_0) / (1 - v_0) = (v(v+2)) / 3 \quad (7)$$

严格满足上述规律结构的损耗和输出均匀度都是很理想的. 然而实际波导中的 v 与分析中的近似值存在偏差, 这些差别的存在使器件性能变差, 为了衡量这个偏差我们定义参数 v :

$$v = (v - v_0) / (1 - v_0) - [(v(v+2)) / 3] \quad (8)$$

v 值越小, 说明 SIE 干涉区内导模的传播常数规律性越强, 可以预见这样的器件性能越接近理想状态.

图 2 给出了不同模式次下 v 随 n_0 的变化, 其中取 $W =$

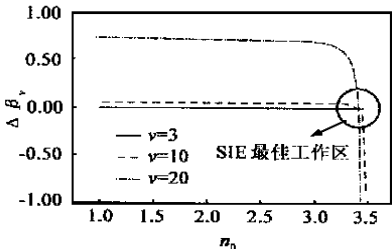


图 2 不同模式对自影像条件的偏差

30 μm . 可以看出, 在 n_0 较小即强限制的条件下, 自影像条件满足得不是很好, 随着 n_0 的增大, 这种现象有所改善, 而且各个模式在 $n_0 = 3.44$ 处均有 $v \rightarrow 0$, 也就是说在 $n_0 = 3.44$ 这个点上存在一个最优值, 器件在此处性能最接近理想状态. 当 n_0 再度增大时, 自影像条件的满足又开始偏差.

从图中还可看出较低的模式比较容易满足 $v \rightarrow 0$ 的条件, 而高次模偏差较大, 根据我们的计算, 在 $n_0 = 1$ 时有 130 个模式存在, 从图 2 的趋势可以推断后面高次模偏差是相当大的, 一般说来高次模的耦合系数相对比较小, 但在对模式很敏感的器件中它们对于输出波形的影响不容忽视. 当 $n_0 = 3.44$ 时只有 25 个模式存在, 在这个意义上说, 弱波导有其优势. 而当限制进一步变弱时, 模式过少, 不能精确地再现输入场, 因此这个最优点的存在是合理的.

3.2 器件的优化

在传统的导模传输分析法中, L 是由式 (1) 决定的, 如果将 SIE 区的中心点作为 $y = 0$, 对于 1×4 功分器来说, U 的值分别为 $\pm 3W/8$ 和 $\pm W/8$ ^[1]. 而对于弱限制 MMI 器件, 各个高次模式的峰值相对强限制来说有些外移, 因此需要一种新的方法来确定输出波导的位置. 我们采用的方法是用基模的有效宽度 W_e 来代替 W . W_e 可用下式近似求得:

$$W_e = W + \lambda / (\sqrt{n_r^2 - n_0^2}) \quad (9)$$

对于传统的导模传输分析法不提倡的弱限制的情况, 取 $W = 30 \mu\text{m}$, $n_0 = 3.44$, 用上述方法优化的结果为 $L = 535.5 \mu\text{m}$ 和 $U = \pm 3.85 \mu\text{m}$, $U = \pm 11.54 \mu\text{m}$.

而 L 的选取则是根据计算取损耗的最小点. 在以后的计算中我们对强限制下的 L 也采用同样的优化.

3.3 计算结果

根据以上优化, 可得在强限制 ($n_0 = 1.0$) 下, 两输出端耦合系数分别为 0.2475 和 0.2464, 代入式 (5)、(6) 计算出的插入损耗和均匀度分别为 0.053 dB 和 2.2×10^{-3} , 而弱限制 ($n_0 = 3.44$) 时输出端耦合系数分别为 0.2493 和 0.2492, 插入损耗和均匀度分别为 0.013 dB 和 2.0×10^{-4} . 由这两项数据可见在一定条件的弱限制下, 不仅器件的插入损耗降低了 4 倍, 而且输出均匀度改善了一个数量级.

图 3 给出了一个优化后的 MMI 光功分器灰度模拟图. 计算所用的数据为: 输入输出波导宽度 $3.0 \mu\text{m}$, $W = 30.0 \mu\text{m}$, $n_0 = 3.44$, $n_r = 3.5$, $L = 535.5 \mu\text{m}$, $U = \pm 3.85 \mu\text{m}$, $U = \pm 11.54 \mu\text{m}$.

弱限制的波导可以采用方便的脊波导湿法刻蚀技术来制

作,一方面根据有效折射率法,湿法刻蚀可以在弱限制的范围,内较大程度地调整 n_0 以达到我们需要的值,另一方面湿法刻蚀的成本低,而且可以克服深腐蚀波导



图 3 优化的弱限制 MMI 功分器灰度模拟图

造成的工艺损耗较大的缺点.湿法刻蚀的不足是形成明显的梯形横截面脊波导,在一定程度上影响器件的尺寸,尤其是对于较敏感的 SIE 区宽度 w . 这个问题可以通过将腐蚀后的波导等效为稍宽的三层波导来解决且精度相当令人满意^[5].

4 结论

本文通过对 MMI 型光功分器 SIE 干涉区内导模的精确数值计算和对输出波导位置的优化,比较了强限制和弱限制两种情况,首次证明在一定条件的弱限制下器件的插入损耗和输出均匀度均超过强限制的情况,说明 MMI 型光功分器的制作可以采用方便的湿法刻蚀,并且采用文[5]的方法可以很好地解决湿法刻蚀形成的梯形截面问题,大大提高器件的精度.

参考文献:

- [1] 杨建义,周强,王明华. GaAs 1×4 光功分器的制作 [J]. 光电子·激光,1999,10(3):203 - 206.
- [2] R. Ulrich, G. Ankele, Self-imaging in homogeneous planar optical waveguides [J]. Appl. Phys. Lett., 1975, 27(6): 337 - 339.
- [3] R. Ulrich, Light-propagation and imaging in planar optical waveguides [J]. Nouv. Rev. Optique., 1975, 6(5): 253 - 262.
- [4] 孙一翎,杨建义,王明华. GaAs 单模 1×4 光功分器的设计 [J]. 光子学报,1997,26(Z1): 257 - 261.
- [5] 尹锐,杨建义,王明华. 梯形截面脊波导的特性分析 [J]. 光学学报,2000,已录用

作者简介:



尹 锐 1974 年出生,1994 年完成浙江大学混合班两年培养计划,1996 年毕业于浙江大学信息与电子工程学系半导体器件与微电子学专业,1996 年起在该校同一专业攻读硕博一贯制博士学位.

杨建义 1969 年出生,1996 年获浙江大学信息与电子工程学系半导体器件与微电子学专业博士学位,现为浙江大学副教授.主要从事集成光器件及 MEMS、MOEMS 研究.

(上接第 87 页)

- [11] S. P. Jeng, R. H. Havemann, M. Chang. Process integration and manufacturability issues for high performance multilevel interconnect [C]. Proc. Mater. Res. Soc. Symp., 1994, 25 - 31.
- [12] G. Ruan, X. Xiao, R. Streiter, et al. A compact analytic equation for estimating the temperature distribution in the interconnect system of ULSI system. to be published.
- [13] T. Ueda, et al. A novel air gap integration scheme for multi-level interconnects using self aligned via plugs [J]. Symp. on VLSI Technology, June 1998, 46 - 47.
- [14] B. Shied, K. C. Saraswat, J. P. McVittie, et al. Air gap formation during IMD deposition to Lower interconnect capacitance [J]. IEEE Electron Device Letters, January 1998, 19(1): 16 - 18.
- [15] K. M. Chang, J. Y. Yang and L. W. Chen. A novel technology to form air gap for ULSI application [J]. IEEE Electron Device Letters, April 1999, 20(4): 185 - 187.
- [16] The National Technology Roadmap for Semiconductors [S]. Semiconductor Industry Association, San Jose, CA, 1997.